文章编号：1000-5773(2012)02-0148-07

PBX 炸药动态 Brazilian 试验及数值模拟研究*

傅 华，李俊玲，谭多望

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900）

摘要：开展了 PBX 炸药的动态 Brazilian 试验，获得了不同加载应变率条件下的拉伸强度；通过高速摄影，获得了 PBX 炸药试样表面裂纹的产生发展过程；采用数字散斑相关方法，获得了试样出现裂纹前的应变场分布。利用离散元方法，开展了考虑 PBX 炸药细观结构的动态 Brazilian 数值模拟，获得了损伤演化发展、并形成裂纹的全过程，模拟结果能初步再现 PBX 炸药的损伤破坏过程。

关键词：PBX 炸药；Brazilian 试验；离散元法；损伤

中图分类号：O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

PBX 炸药是武器战斗部杀伤、破坏和动力能源的关键材料，随着现代高性能武器系统的飞速发展，对提高 PBX 炸药在各种条件下安全性的要求日益迫切。武器战斗部装药在勤务过程以及终点弹道阶段，可能经受长脉冲、多次高过载作用、压缩、拉伸、往复压－拉、与壳体壁面的摩擦等复杂过程，PBX 炸药的动力学响应及损伤机理的差异往往导致炸药后续的反应特性与起爆机制的差异，继而对炸药安全性评估产生影响。当前武器战斗部装药的安全性评估除了开展模拟环境条件及综合考核试验外，通常借助数值模拟技术对过程特征状态进行量化分析，而计算能否如实反映过程的特征参量，很大程度上取决于计算模型中炸药的强度参量是否准确、损伤模型能否描述过程的机制本质和量化特征。因此，开展 PBX 炸药的动态力学响应以及损伤机理研究，可为武器战斗部装药的安全性分析提供基础实验数据和理论支撑，对分析和评估高过载条件下炸药的生存能力具有重要意义，是开展炸药安全性研究的重要内容。

Brazilian 试验也称为间接拉伸试验或劈裂试验，是 1940 年由巴西和日本科学家提出并设计的一种研究岩石、混凝土力学性质的试验[1]。这种试验方法是在短圆柱试样的侧面沿径向施加两集中载荷，致使试样产生拉伸应力直至破坏。由于设计巧妙、试样制备简单，该试验方法后来被推广应用于含能材料的力学及损伤机理研究[2-7]。

本研究采用分离式霍普金森压杆（SHPB）装置进行加载，开展了 PBX 炸药的动 Brazilian 试验，利用嵌入杆端的石英晶体测量试样所受的应力，获得了不同加载应变率条件下的拉伸强度；采用高速摄影对 PBX 炸药的变形破裂过程进行了实时观察，结合数字散斑技术，获得了试样破裂前的应变场分布；利用离散元方法，开展了考虑 PBX 炸药非均匀细观结构的动态 Brazilian 模拟，模拟结果能初步再现 PBX 炸药的损伤破裂过程。

* **收稿日期**：2010-08-24；**修回日期**：2010-10-20

基金项目：国家自然科学基金（10772167，10902100）；中国工程物理研究院科学技术重大基金（2009A0201008）；国防科技重点实验室基金（9140C6709020907，9140C6709021005）

作者简介：傅 华（1979—），男，硕士，助理研究员，主要从事炸药爆轰物理及其动力学研究. E-mail：Huafu_103@163.com

2　试验装置

SHPB 是研究材料应变率在 $10^2 \sim 10^4\ s^{-1}$ 范围内力学性能的常用装置,本研究将 SHPB 作为加载手段,动态 Brazilian 试验装置如图 1 所示。SHPB 杆材料为 2A12-T4 铝合金,直径 20 mm,子弹长 200 mm,入射杆长 2 000 mm,透射杆长 1 000 mm。采用的半导体应变片以串联方式连接,通过超动态应变仪采集信号并存储于数字示波器,压电石英晶体信号经电荷放大器放大后存储于示波器,波整形器材料采用软橡皮。采用高速相机对试样的变形破裂过程进行拍摄,拍摄的数字图像传输至计算机保存,数字图像使用数字散斑相关方法进行处理,以获得试样变形区域的应变场分布。

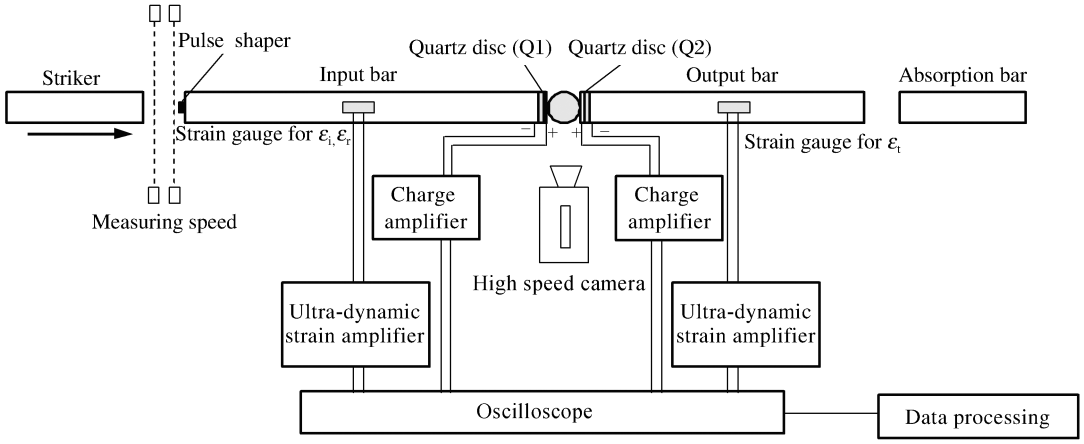


图 1　Brazilian 试验装置

Fig. 1　Arrangement of Brazilian test

炸药采用平台 Brazilian 盘试样,示意图如图 2 所示,平台 Brazilian 盘试样的安装方式与常规的 SHPB 试验略有不同,试验时,将试样两平台端面与杆端接触放置,试样径向与杆轴线方向一致。为了保证试样两端所受应力一致,需采用整形器延缓加载波形上升前沿。试验过程中利用嵌入杆端的石英压电晶体片直接获得试样两端载荷,同时还可直观地检测试样两端的应力平衡状态。

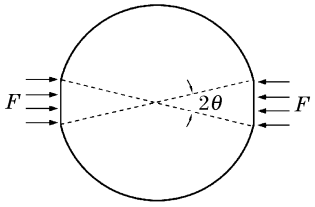


图 2　平台 Brazilian 盘示意图

Fig. 2　Scheme of flat Brazilian disk

试验时从试样平台端沿径向施加载荷,使得试样产生拉伸应力,当超过试样拉伸强度时,试样发生劈裂。根据二维弹性理论,试样中心点处的拉伸强度 σ_t 的计算公式为

$$\sigma_t = 2FY(\theta)/\pi BD \tag{1}$$

式中:F 为作用在试样上的载荷峰值,单位为 N;$F = A \cdot \sigma_m$,这里 A 为杆的截面积,σ_m 为晶体片测量的应力峰值;B 为圆盘的厚度,单位为 m;D 为圆盘直径,单位为 m;2θ 是加载平台所对应的圆心角,Y 是与 θ 密切相关的系数,本研究中 $2\theta = 20°$,此时 $Y(\theta) = 0.964$。

3　试验结果

3.1　拉伸强度

PBX 炸药是由炸药晶体、粘结剂按一定比例压制而成的塑料粘接炸药,试验采用的炸药试样分 PBX-1、PBX-2、PBX-3 等 3 种,密度分别为 1.86、1.85、1.71 g/cm^3,尺寸均为∅20 mm×12 mm。

试验测得的石英晶体片的典型压力信号如图 3 所示。应力加载前沿缓慢上升，试样两端应力基本重合，试样内部应力分布均匀，当到达峰值点时，沿加载方向在试样中心区域出现裂纹，继而逐渐发生破裂，由于试样两端破裂的差异，导致应力在卸载过程出现差异。

获得试样两端的应力峰值后，根据公式(1)可获得 PBX 炸药的拉伸强度，3 种 PBX 炸药的拉伸强度与应变率之间的关系如图 4 所示。从图 4 中可见，3 种 PBX 炸药的拉伸强度与应变率的关系均按一定规律变化，即拉伸强度都随着应变率的增加而增加，炸药密度越大，拉伸强度越大。

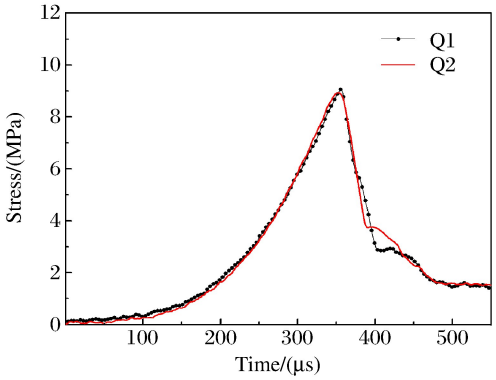


图 3 试样两端晶体片所测应力波形

Fig. 3 Stress waves obtained by quartz crystal

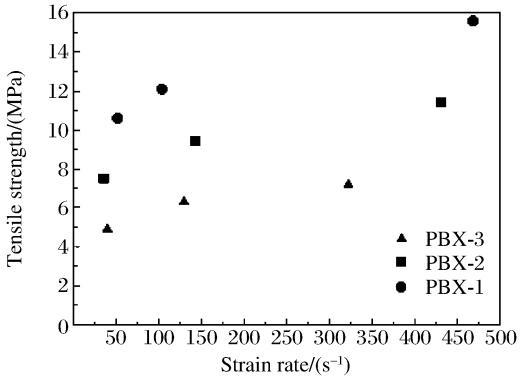


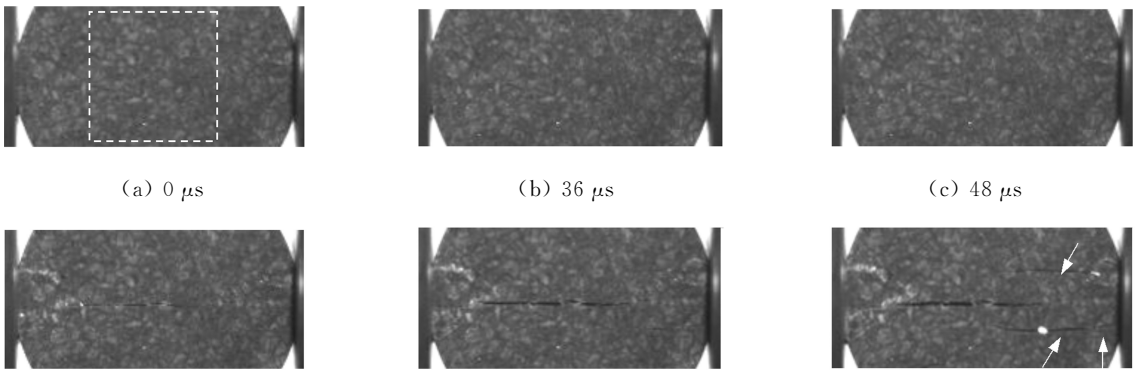
图 4 不同应变率下的拉伸强度

Fig. 4 Tensile strength at different strain rates

3.2 破裂过程

试样的破裂过程通过高速摄影实时拍摄，拍摄幅频率与分辨率分别为 8.64×10^4 s^{-1} 和 256 像素×192 像素、18×10^4 s^{-1} 和 256 像素×80 像素，相机触发信号由测速信号给出，同时检测石英晶体片时间，将高速摄影拍摄的时间与试样加载过程相关联，确定记录零时。

通过高速摄影获得的 PBX 炸药在动态 Brazilian 试验的破裂过程如图 5、图 6 所示。试样受到应力加载，试样及中心区域发生了变形，在图 5(a)～图 5(c)中，虽然在表面未出现肉眼可见的明显裂纹，但拉伸应变却在缓慢增加，是裂纹起裂的孕育过程。由于增加了拍摄幅频率，从图 6(b)～图 6(d)可见裂纹发展、演化、起裂的过程。随着应力的增加，当超过试样拉伸强度时，试样发生劈裂，中心出现沿加载方向的主裂纹(见图 5(d)、图 6(d))，在两侧拉伸应力的作用下，裂纹逐渐扩展，裂纹宽度增加(见图 5(e)、图 6(e))，由于受到 PBX 炸药非均匀的细观结构以及侧面稀释波的影响，主裂纹两侧出现次生裂纹，同时在试样与杆端接触处发生应力集中现象，以端面为起点，出现多条次生裂纹，逐渐向试样内部传播扩展(如图 5(f)、图 6(f)箭头所示)。在主裂纹与次生裂纹在试样内部的共同传播扩展下，试样最终破碎。

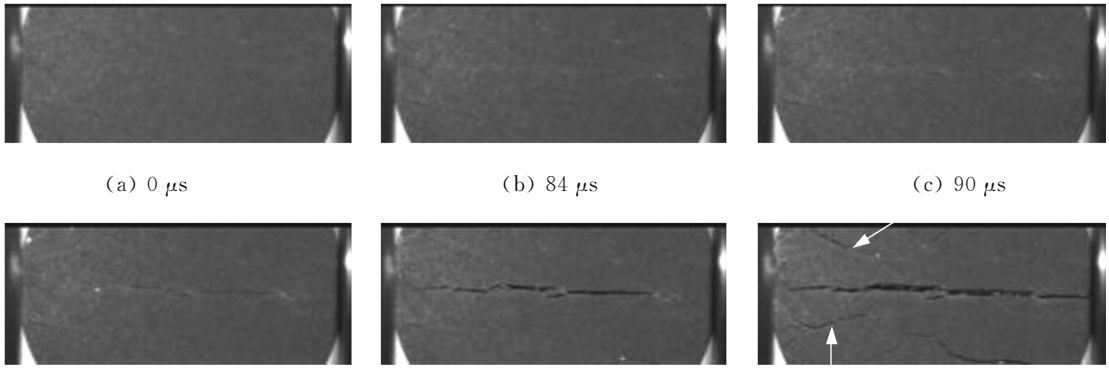


(a) 0 μs (b) 36 μs (c) 48 μs

(d) 108 μs (e) 120 μs (f) 144 μs

图 5 PBX-2 破裂过程(8.64×10^4 s^{-1})

Fig. 5 Fracture process of PBX-2(8.64×10^4 s^{-1})



(a) 0 μs　(b) 84 μs　(c) 90 μs

(d) 96 μs　(e) 126 μs　(f) 128 μs

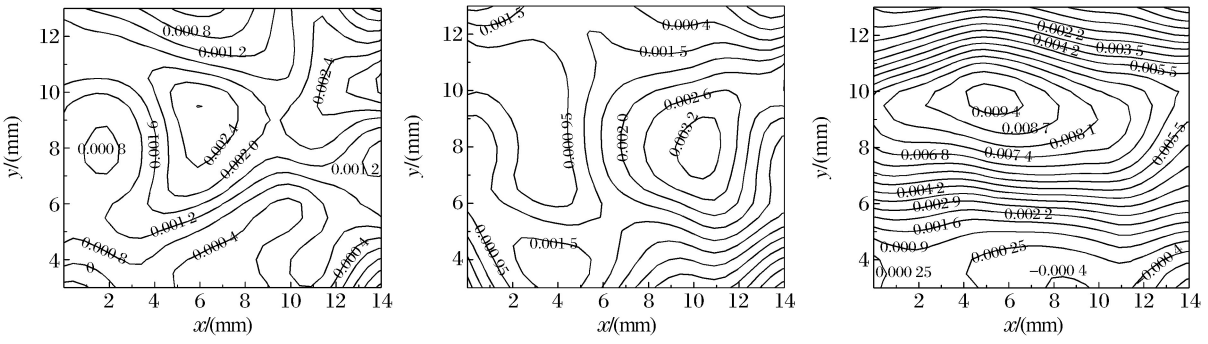
图 6　PBX-1 破裂过程(18×10^4 s^{-1})

Fig. 6　Fracture process of PBX-1(18×10^4 s^{-1})

3.3　应变场分布

3.2 节中提到,在应力未超过试样拉伸强度前,试样中心区域应变仍增加。通过高速摄影技术获得一系列数字图像后,结合数字散斑相关方法,可以获得试样在动态拉伸条件下出现破裂前的应变场分布。数字散斑相关方法[8-9](Digital Speckle Correlation method,DSCM)是一种通过图像序列来估计物体运动的方法,其基本原理是匹配不同状态下数字化图像上的同一个点,通过追踪点的运动来获得物体表面变形信息。承载变形信息的散斑可以通过喷漆等人工斑化的方法获得,也可以把物体表面的特殊纹理作为散斑场进行分析处理。与传统的采用应变片测量应变的方法相比,数字散斑相关方法具有非接触、全场测量等优点。

将图 5 中 3 个不同加载时刻的数字图像,与初始图像进行数字散斑相关处理,相关区域如图 5(a)虚线框区域,获得的应变场如图 7 所示。从图 7 可见,由于 PBX 炸药具有多组分非均质的特点,加载初期应变场分布并没有呈现沿加载轴线的严格对称,应变场幅值均较小,最大拉应变发生在试样中心,其值为 0.002 4,随着载荷的增加,拉伸应变逐渐增加,最大应变值增加到 0.003 2,在拉应力超过拉伸强度前,出现了拉伸应变集中区域,应变场呈现出沿加载轴线的明显对称分布,预示着试样即将在中心区域沿加载方向出现裂纹,随后时刻出现如图 5(d)所示的劈裂现象。



(a) 36 μs　(b) 48 μs　(c) 96 μs

图 7　不同时刻相关区域的应变场分布

Fig. 7　Strain field at different time

4　数值模拟

4.1　计算模型

离散元法 (Discrete Element Method)的基本思想是,把不连续体或连续体离散为具有一定物理意义的独立“微元”或“粒子”,相邻的单元之间存在一种或几种作用力,单元的运动受牛顿第二运动定律支

配，适合于界面弱连接的非连续介质问题或连续体到非连续体转化的断裂、破碎等问题，在开展多组分炸药材料损伤机理模拟研究方面具有其算法优势。

基于 PBX 炸药细观结构的离散元计算模型如图 8 所示，二维离散单元为圆盘形，不规则多边形为 HMX 晶体，质量约占 95%，其余为粘结剂(Binder)，模型局部放大如图 9 所示，平台 Brazilian 试样直径 1.2 mm，HMX 晶体单元半径 6 μm，粘结剂单元半径为 2 μm，时间步长 0.2 ns，单元总数目为 22 059 个。加载应力按图 4 应力波形输入，幅值为原波形的 5%。

单元间的作用力形式见文献[10]，离散元本构方程采用“朱-王-唐”非线性粘弹性模型，HMX 晶体与粘结剂的离散元参数见表 1，其中 ρ 为密度，C_0、λ 为冲击绝热参数，α^{ij}、m、n 为中心势作用力参数，μ^{ij} 为摩擦系数，G 为剪切模量，C_n 为法向粘性系数，ε_y 为屈服应变，ε_b 为法向断裂应变。

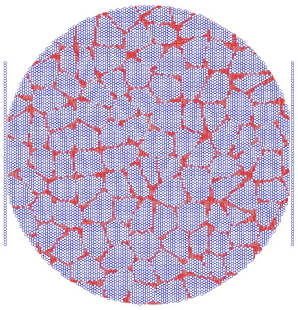


图 8 离散元计算模型

Fig. 8 Simulation model of discrete element

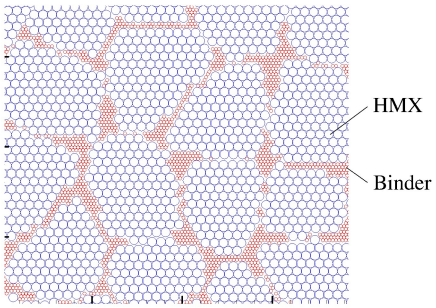


图 9 模型局部

Fig. 9 Magnifying model

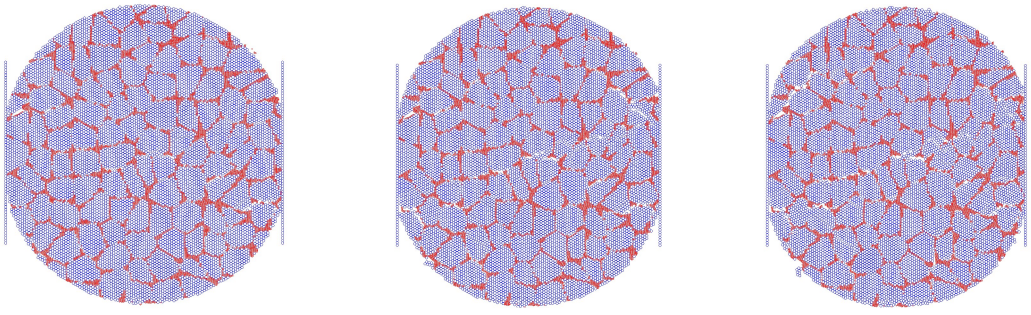
表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material	ρ /(g/cm^3)	C_0 /(km/s)	λ	α^{ij} /(GPa)	m	n	μ^{ij}	G /(GPa)	C_n /(Pa·s)	ε_y	ε_b
HMX	1.9	290	2.06	0.185	1.0	3.0	0.1	10.74	11	0.02	0.005
Binder	1.1	230	1.70	0.780	1.0	2.0	0.1	6.80	11	0.10	0.020

4.2 模拟结果

模拟结果与观测到的试验现象基本一致，结果如图 10 所示。试样中心区域裂纹的传播与扩展路径与加载方向一致，裂纹扩展主要以晶体边界与粘结剂间的脱粘损伤为主，如图 10(a)所示，随着应力的增加，在主裂纹两侧出现了沿晶体内部的穿晶断裂，并逐渐传播扩展为次生裂纹。由于非均匀结构和稀疏波的影响，试样外边缘局部出现破裂脱落现象。同时平台端面由于应力集中，端面产生次生裂纹并向试样中心扩展，如图 10(c)所示。



(a) 120 μs (b) 140 μs (c) 160 μs

图 10 PBX 炸药动态 Brazilian 试验模拟

Fig. 10 Dynamic Brazilian test of PBX

两种典型损伤形式如图 11 所示。由于 PBX 炸药细观结构中不规则炸药晶体与粘结剂的随机分布,因此在载荷的作用下,其损伤的发展与演化呈明显的非均匀性。模拟中,晶体与粘结剂单元运动复杂,质点速度场分布如图 12 所示。从图 12 中可见,晶体与粘结剂的运动速度不同,运动方向甚至相反,从而导致脱粘的发生,炸药晶体内部的运动速度也不相同,各单元在内部产生剪切和摩擦作用,致使晶体破裂,在以上拉压、剪切、摩擦等复杂作用下,局部损伤逐渐演化发展,形成裂纹。



(a) Crack between HMX and binder　　(b) Crack in HMX crystal

图 11　两种典型的损伤形式

Fig. 11　Two types of damage



(a) 140 μs　　(b) 150 μs

图 12　细观结构质点速度场分布

Fig. 12　Velocity field in meso-structure

5　结　论

(1) 采用 SHPB 开展了 PBX 炸药的动态 Brazilian 试验,获得了 3 种 PBX 炸药的动态拉伸强度。结果表明,3 种 PBX 炸药动态拉伸强度与应变率的关系均按一定规律变化,即拉伸强度都随着加载应变率的增加而增加。

(2) 利用高速摄影对动态 Brazilian 试验进行了实时拍摄,获得了 PBX 炸药试样表面裂纹的产生发展过程;采用数字散斑相关方法,获得了试样出现裂纹前的应变场分布。结果表明,应变场分布能初步预示局部损伤、裂纹的发展趋势。

(3) 开展了考虑 PBX 炸药非均匀细观结构的动态 Brazilian 模拟,获得了损伤演化发展、形成裂纹的全过程,模拟结果与试验结果基本一致。

References:

[1]　Akazawa T. International association of testing and research laboratories for materials and structures [J]. RILEM Bull,1953,13:13-23.

[2] Johnson H D. Mechanical properties of high explosives, MHSMP-74-19 [R]. Amarillo, TX, USA: Mason and Hanger-Silas Mason Co, Inc, 1974.

[3] Johnson H D. Mechanical properties of LX-10-1 evaluated with the diametric disc test, MHSMP-79-08 [R]. Amarillo, TX, USA: Mason and Hanger-Silas Mason Co, Inc, 1979.

[4] Johnson H D. Diametric disc and standard tensile test correlation study, MHSMP-81-22 [R]. Amarillo, TX, USA: Mason and Hanger-Silas Mason Co, Inc, 1981.

[5] Rae P J, Gbldrein H T, PalmerS J P, et al. Studies of the failure mechanisms of polymerbonded explosives by high resolution moue interferometry and environmental scanning electron microscopy [A]//Air Force Research Laboratory. Paper Summaries 11th International Detonation Symposium [C]. Colorado, 1998: 235-239.

[6] Rae P J, Palmer S J P, Goldrein H T, et al. White-light digital image cross-correlation (DICC) analysis of the deformation of composite materials with random microstructure [J]. Optics Lasers in Eng, 2004, 41(4): 635-648

[7] Chen P W, Huang F L, Zhang Y, et al. Brazilian test and its application in the study of the mechanical properties of explosives [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 533-537. (in Chinese)
陈鹏万, 黄风雷, 张 瑜, 等. 用巴西实验评价炸药的力学性能 [J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 533-537.

[8] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge [J]. J Phys E: Scientific Instruments, 1981, 14(11): 1270-1273.

[9] Peter W H, Ranson W F. Digital imaging technique in experimental stress analysis [J]. Optical Eng, 1982, 21(3): 427-431.

[10] Fu H, Liu C L, Wang W Q, et al. Preliminary simulation of hot spot formation for plastic bonded explosives at mesoscale [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 515-520. (in Chinese)
傅 华, 刘仓理, 王文强, 等. 细观尺度下塑料粘结炸药热点生成的初步模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 515-520.

Dynamic Brazilian Test and Simulation of Plastic-Bonded Explosives

FU Hua, LI Jun-Ling, TAN Duo-Wang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Dynamic Brazilian test of plastic-bonded explosives was investigated by split Hopkinson pressure bar(SHPB). The tensile strengths of three PBXs were acquired under different strain rates. The evolution of crack on sample surface was captured using high-speed camera. The strain field was calculated by digital speckle correlation method before samples occured to crack. The simulation on dynamic Brazilian test was performed using discrete element method, and the simulation model considering meso-structure was acquired. The simulation results show the produce and evolution process of damage and crack, and the simulation results are in accordance with the experimental results.

Key words: plastic-bonded explosives; Brazilian test; discrete element method; damage